

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kajian Paten

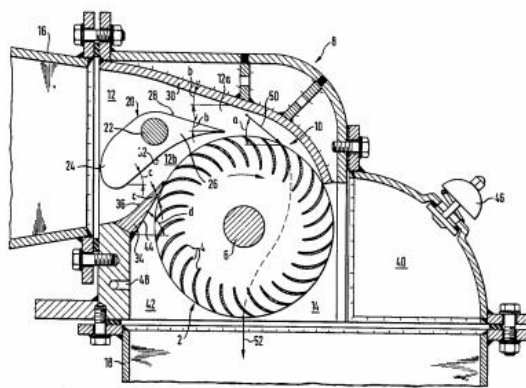
Turbin air *cross-flow* telah dipatenkan oleh Ossberger *et al* pada tahun 1986. Turbin *crossflow* memiliki selubung, *runner*, saluran masuk horisontal, dan saluran keluar vertikal. Saluran masuk dibagi oleh baling-baling berpusat untuk membentuk sepasang saluran masuk. Saluran masuk yang membentang secara horizontal dihubungkan ke selubung pada sisi saluran masuknya, dan saluran keluar yang memanjang secara vertikal dibentuk sebagai tabung rancangan dan dihubungkan ke selubung pada saluran keluarnya.

Saluran masuk dan baling-baling diatur sedemikian rupa sehingga aliran saluran masuk ke *runner* diarahkan ke bawah pada jarak sekitar 40° terhadap bidang horisontal, dan aliran keluar dari *runner* diarahkan secara vertikal. Pada outlet ada sepasang ruang samping di kedua sisi *runner* menghasilkan peningkatan *cross section* yang sesuai dengan penampang tabung draft. Kedua ruang samping ini dilepaskan ke atmosfer dengan katup ventilasi tunggal sehingga tekanan hisap dalam *draft tube* tidak melebihi nilai yang telah ditentukan.

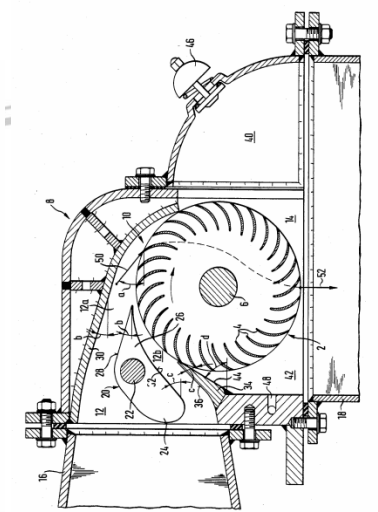
Menurut Harloff (1981), mesin turbin *Crossflow* menyediakan tenaga poros dengan menghasilkan energi dari fluida yang bergerak. fluida ini terdiri dari cairan dan gas. Fluida dialirkan ke dalam rotor berdasar rata-rata inlet. Cairan kemudian

mengalir melalui rotor pertama, interior, rotor kedua, dan menuju pintu keluar dari mesin pada tekanan ambien. Karena perubahan pada momentum sudut fluida di seluruh rotor turbin, torsi diterapkan pada daya keluar poros. Daya keluar tersebut dapat digunakan, misalnya, untuk menggerakkan pompa air, generator listrik, atau kompresor.

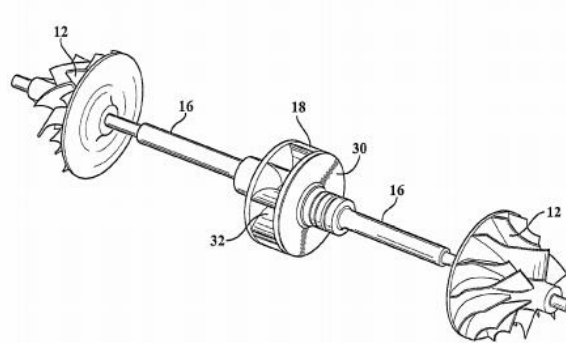
Gas buang turbocharger dengan turbin *Crossflow* melintas melalui roda turbin aliran silang pada diameter luarnya. Tidak seperti kebanyakan turbin untuk pengisi daya Turbo otomotif yang memiliki inlet gas buang radial dan outlet gas buang aksial, turbin *crossflow* memiliki inlet gas buang radial dan outlet (radial, aliran radial). Turbin ini cocok untuk geometri turbin variabel, termasuk dengan panduan tunggal atau beberapa panduan baling dalam inlet turbin untuk mengontrol aliran variabel dan dengan demikian kinerja tahap turbin. Turbin *crossflow* memungkinkan ukuran yang lebih rendah dan pilihan pengemasan yang sangat baik, seperti roda turbin aliran tunggal atau ganda antara dua roda kompresor (Bakula *et al*, 2015).



(a)



(b)



(c)

**Gambar 2.1** Gambar turbin *Crossflow* (a) horizontal (b) vertikal (Ossberger et al, 1986) (c) *turbocharger* (Bakula et al, 2015).

## 2.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terkait turbin *Crossflow* untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) telah dilakukan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Firmansyah (2011) memperoleh hasil energi listrik dari turbin *crossflow* adalah sebesar 50 kw dengan *head* bersih 21 m dan debit  $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$ . Penelitian lain penggunaan turbin *crossflow* pada PLTMH juga dilakukan oleh Prihartarto (2008), pada *head* 1,5 m dan debit  $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ , daya keluaran paling besar yaitu 13,54 watt dan efisiensi total yang paling besar adalah 6,78%, didapat ketika alternator diberi beban lampu 45 watt.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil penelitian Mafrudin (2013) yang dilakukan pada air pembuangan limbah yang sudah melalui proses pengendapan, pemupukan dan pemeriksaan yang kemudian dialirkan kesungai dengan debit rata-rata  $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan ketinggian diatas permukaan air sungai lebih dari 2 m, memberikan kesimpulan bahwa daya yang dihasilkan turbin air *crossflow* yaitu

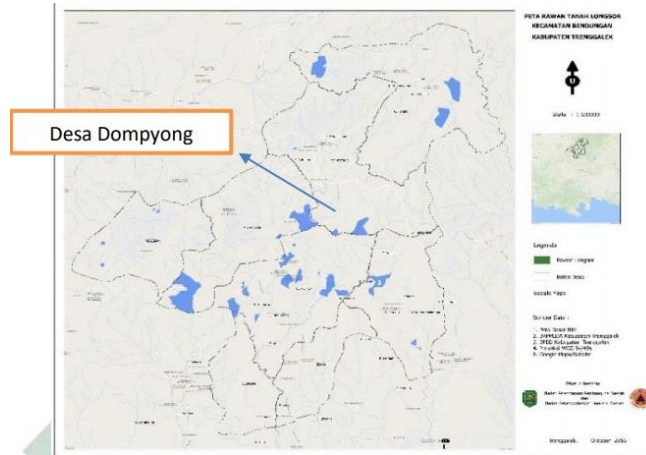
236,82 Watt, dan efisiensi mekanik turbin air cross-flow yaitu 30 %. Sedangkan daya listrik yang dihasilkan generator adalah 162 Watt.

### **2.3 Topografi Desa Dompyong Bendungan Trenggalek**

Desa Dompyong merupakan salah satu desa yang terletak di Kecamatan Bendungan, Kabupaten Trenggalek (Gambar 2.2), tepatnya berada di bagian utara dari pusat Kabupaten Trenggalek. Desa Dompyong merupakan desa yang berada di wilayah pegunungan Dilem Wilis dengan jarak 20 Km dari pusat pemerintahan. Sedangkan jarak dari kantor desa dengan Kantor Kecamatan Bendungan hanya berkisar 4 meter. Untuk menuju ke Desa Dompyong dari pusat pemerintahan membutuhkan waktu kurang lebih 1 jam menggunakan kendaraan bermotor untuk dapat sampai di kantor desa. Kondisi akses jalan yang sudah beraspal dan sedikit berkelok membuat Desa Dompyong mudah dilalui. Secara geografis Desa Dompyong berada di daerah dataran tinggi atau daerah perbukitan yang berada pada ketinggian 729 Meter diatas permukaan laut dengan luas wilayah 1782 Ha. Serta suhu rata-rata harian mencapai 27 derajat celsius dengan curah hujan rata-rata 2.335 mm per tahun. Desa Dompyong terkenal dengan udaranya yang dingin serta banyaknya kabut terutama ketika malam hari.

Desa Dompyong merupakan pusat pemerintahan karena Kecamatan Bendungan berlokasi di Desa Dompyong, dimana kantor kecamatan berada tepat disebelah Balai Desa Dompyong . Selain itu di Dompyong juga terdapat kantor kepolisian dan kantor Babinsa dan Pasar. Dalam tahun terakhir ini, tepatnya pada

tahun 2016 telah di launching Desa Wisata Dompjong yang meliputi wisata Air Terjun (Coban Rambat), Kandang Koloni dan Pabrik Kopi Peninggalan Belanda.



**Gambar 2.2. Topografi Desa Dompjong**  
(Sumber : BPBD Trenggalek)

Desa Dompjong masih ada sebagian rumah warga yang pelosok belum teraliri listrik tepatnya di daerah dekat air terjun, dari penelitian (Studi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Dompjong 50kW Di Desa Dompjong, Bendungan, Trenggalek Untuk Mewujudkan Desa Mandiri Energi (DME), Ifhan Firmansyah dkk) diketahui bahwa desa Dompjong memiliki potensi untuk bisa menghasilkan listrik dari PLTMH mencapai 50Kw.

## 2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

### 2.4.1 Pengertian PLTMH

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) atau mikrohidro, adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga penggerak air seperti saluran irigasi, sungai atau air terjun alami dengan memanfaatkan ketinggian terjunan (*head*) dan jumlah debit air.

Istilah mikrohidro terdiri dari kata *mikro* yang berarti kecil dan *hidro* yang berarti air. Secara teknis, mikrohidro memiliki tiga komponen yaitu air (sebagai sumber energi), kincir dan generator. Mikrohidro memanfaatkan energi potensial jatuhnya air (*head*). Semakin tinggi jatuhnya air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik (Gunawan, 2013).

Berdasarkan besar daya output-nya, PLN mengklasifikasikan pembangkit listrik tenaga air menjadi 3 macam, yaitu: pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH), pembangkit listrik tenaga minihidro (PLTM) dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). PLTMH memiliki daya output kurang dari 100 kW, PLTM memiliki daya output 100-1000 kW dan PLTA memiliki daya output lebih dari 1000 kW (Ibrahim, 2006 dalam Arya, 2012).

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) merupakan tipe pembangkit tenaga air yang sesuai diterapkan di lokasi-lokasi yang memiliki tinggi jatuh rendah dan aliran air yang tidak terlalu banyak. Sebagai sumber energi terbarukan, PLTMH bisa menjadi salah satu alternatif penyediaan energi listrik yang ramah lingkungan dan untuk menjangkau daerah-daerah yang sulit terlistriki melalui gridline (Harsarapama, 2012).

PLTMH adalah termasuk dalam kategori PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro), karena prinsip kerja dan cara pembuatan PLTMH tersebut sama dengan PLTA umumnya. PLTMH juga dapat dikatakan sebagai PLTA berkapasitas kecil. Akhir - akhir ini di dunia 7 termasuk negara-negara maju, banyak terdapat pembangunan PLTA berkapasitas kecil. Pembagian PLTA dengan kapasitas kecil pada umumnya adalah sebagai berikut.

- a. PLTA Mikro < 100 kW
- b. PLTA Mini 100 - 999 kW
- c. PLTA Kecil 1000 - 10000 kW

Salah satu sebab bagi negara-negara maju membangun PLTA berkapasitas kecil ini adalah dikarenakan harga minyak OPEC yang terus meningkat, dan di samping bertambahnya kebutuhan listrik di negara-negara maju tersebut (Patty,1995).

#### 2.4.2 Prinsip Kerja PLTMH

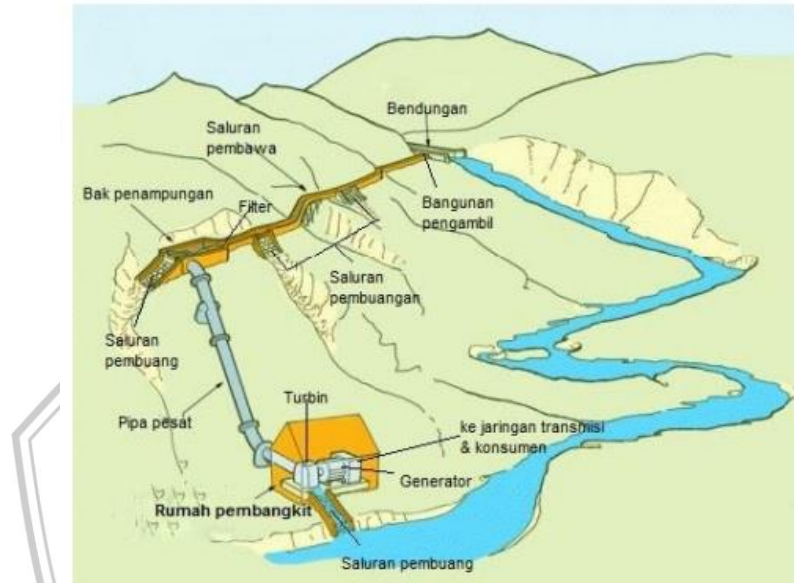
Tenaga air atau *hydro power* merupakan daya listrik yang dihasilkan dari pemanfaatan aliran air. Pada PLTMH, digunakan turbin untuk mengubah energi potensial air dari bendungan atau air terjun menjadi energi kinetik. Kemudian melalui generator, energi kinetik diubah menjadi energi listrik (Penche dan Minas, 1998).

Prinsip kerja mikrohidro untuk menghasilkan tenaga yang dapat dimanfaatkan melibatkan dua hal yaitu debit air dan ketinggian jatuh air (*head*). Prinsipnya adalah sebuah sistem konversi energi dari bentuk ketinggian dan aliran (energi potensial) kedalam bentuk energi mekanik dan energi listrik (Doland J, 1984).

Prinsip kerja dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) digambarkan pada Gambar 2.3 dan secara detail diuraikan sebagai berikut (Ezkhelenergy,2013).

1. Aliran sungai dibendung agar mendapatkan debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H), kemudian air yang dihasilkan disalurkan melalui saluran penghantar air menuju kolam penenang.
2. Kolam penenang dihubungkan dengan pipa pesat, dan pada bagian paling bawah di pasang turbin air.

3. Turbin air akan berputar setelah mendapat tekanan air (P), dan perputaran turbin dimanfaatkan untuk memutar generator.
4. Setelah mendapat putaran yang konstan maka generator akan menghasilkan tegangan listrik, yang dikirim ke konsumen melalui saluran kabel distribusi.



**Gambar 2.3. Prinsip kerja PLTMH**  
(Sumber: Ezkhelenergy, 2013)

Dari prinsip kerja tersebut, turbin merupakan salah satu komponen terpenting dalam pembangunan PLTMH karena turbin yang merubah tekanan air yang mengalir untuk menggerrakan generator. Pemilihan turbin harus sesuai dengan ketinggian air dan aliran air supaya mendapatkan efisisensi yang tinggi dalam pembangunan PLTMH.

## 2.5 Turbin

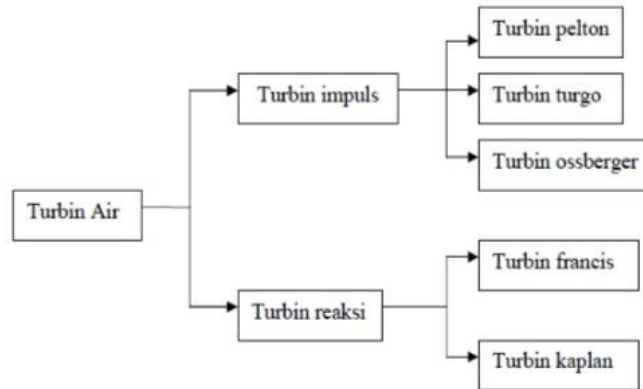
Turbin secara umum dapat diartikan sebagai mesin penggerak mula di mana energi fluida kerja yang digunakan langsung memutar roda turbin, fluida kerjanya



yaitu berupa air, uap air dan gas. Turbin air dapat diartikan sebagai suatu mesin penggerak mula dengan air sebagai fluida kerjanya (Arismunandar, W., 2004). Berbeda yang terjadi pada mesin torak (motor bakar), pada turbin tidak terdapat bagian mesin yang bergerak translasi. Bagian turbin yang berputar dinamai rotor (runner pada turbin *cross-flow*) atau roda turbin, sedangkan bagian yang tidak berputar dinamai stator atau rumah turbin. Roda turbin terletak didalam rumah turbin dan roda turbin memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar bebannya (generator). Kalau ditinjau dari daya yang dihasilkan turbin air, maka dikenal istilah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang maksudnya adalah turbin air yang dapat menghasilkan daya kurang dari 100 kW dan sumber airnya relatif kecil.

#### 2.5.1 Klasifikasi Turbin

Turbin air berfungsi mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, kemudian energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik. Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis (momentum fluida kerjanya), turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi (Arismunandar, W., 2004). Diagram klasifikasi turbin air dapat dilihat pada gambar 2.4.



**Gambar 2.4. Diagram Klasifikasi Turbin**  
(Sumber : Mafrudin, 2013)

### 1. Turbin Impuls

Turbin impuls memiliki tekanan sama pada setiap sudu geraknya (runner). Energi potensial air diubah menjadi energi kinetik melalui nosel. Air keluar nosel yang mempunyai kecepatan tinggi membentur sudu turbin. Setelah membentur sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum (impuls) yang mengakibatkan roda turbin akan berputar. Semua energi tinggi tempat dan tekanan ketika masuk ke sudu jalan turbin dirubah menjadi energi 12 kecepatan. Jenis dari turbin impuls adalah turbin pelton, turbin turgo dan turbin *crossflow*.

### 2. Turbin Reaksi

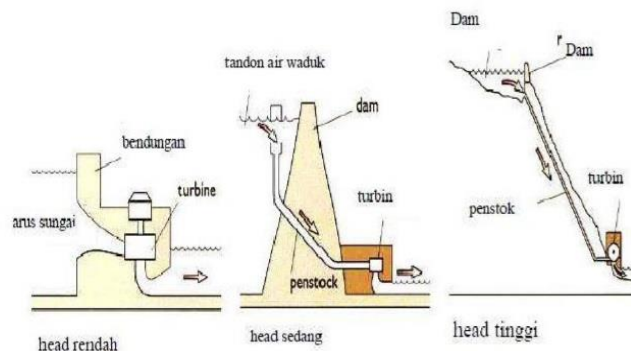
Turbin reaksi memanfaatkan energi potensial untuk menghasilkan energi gerak. Pada turbin ini terdapat sudu yang menyebabkan penurunan tekanan air yang mengakibatkan timbul gaya pada sudu sehingga runner dapat berputar. Runner turbin yang berada dalam rumah turbin sepenuhnya tercelup dalam air. Turbin reaksi bekerja secara langsung mengubah energi kinetik juga energi tekanan secara bersamaan menjadi energi mekanik. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini

dikelompokkan sebagai turbin reaksi, jenis dari turbin ini adalah turbin francis dan turbin kaplan.

### 2.5.2 Kriteria Pemilihan Jenis Turbin

Jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan turbin. Faktor tinggi jatuhan air efektif (*Net Head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin merupakan faktor utama yang mempengaruhi pemilihan jenis turbin, sebagai contoh : turbin pelton efektif untuk operasi pada tinggi jatuhan air (*head*) tinggi, sementara turbin propeller sangat efektif beroperasi pada tinggi jatuhan air (*head*) rendah. Faktor daya (*power*) berkaitan dengan tinggi jatuhan air (*head*) dan debit yang tersedia (Ismono, 1999). Kecepatan (putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Pada dasarnya daerah kerja operasi turbin menurut (Keller2, 1975) dikelompokkan menjadi 3 sebagai berikut

- *Low head power plant*
- *Medium head power plant*
- *High head power plant*



**Gambar 2.5. Tingkat Head Sumber Air**  
(Sumber: Vienna, 1981)

Pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu sebagai berikut.

1. Berdasarkan Kecepatan Spesifik ( $N_s$ )

Kecepatan (putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Faktor tersebut seringkali diekspresikan sebagai "kecepatan spesifik,  $N_s$ ", yang didefinisikan sebagai berikut.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_e f s^{\frac{5}{4}}} \quad (2.1)$$

dimana:

$N_s$  = kecepatan spesifik turbin (rpm)

$N$  = kecepatan putaran turbin (rpm)

$H_e f s$  = tinggi jatuh efektif (m)

$P$  = daya turbin output ( $H_p$ )

Output turbin ditentukan dengan persamaan (Fox dan McDonald, 1995).

$$P = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \eta \quad (2.2)$$

dimana :

$P$  = daya turbin (Watt)

$\rho$  = massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q$  = debit air ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$g$  = gaya gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$H$  = head efektif (m)

$\eta$  = efisiensi turbin

Daya air yang tersedia dinyatakan sebagai berikut;

$$P_{max} = \frac{QHe}{8,8} \quad (2.3)$$

Dimana;

$$P_{max} = (\text{kW})$$

$$Q = \text{debit air (m}^3/\text{s)}$$

$$H = \text{tinggi air jatuh (m)}$$

Beberapa rumus yang dikembangkan dari data eksperimental dapat digunakan untuk melakukan estimasi perhitungan percepatan spesifik berbagai jenis turbin (Layman, 1998).

Pelton	$N_s = \frac{85,49}{H^{0,243}}$	(Sievo and Lugaresi, 1978)
Francis	$N_s = \frac{3763}{H^{0,854}}$	(Scweiger and Gregory, 1989)
Kaplan	$N_s = \frac{2283}{H^{0,486}}$	(Scweiger and Gregory, 1989)
Crossflow	$N_s = \frac{513,25}{H^{0,505}}$	(Kpordze and Warnick, 1983)
Propeler	$N_s = \frac{85,49}{H^{0,243}}$	(USBR, 1976)

Kecepatan spesifik setiap turbin memiliki kisaran (*range*) nilai kecepatan spesifik tertentu. Tabel 2.1 menjelaskan batasan kecepatan spesifik untuk beberapa turbin konvensional.

**Tabel 2.1 Batasan Kecepatan Spesifik Turbin**

No	Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik
1	<i>Pelton dan kincir air</i>	$10 \leq N_s \leq 35$
2	<i>Francis</i>	$60 \leq N_s \leq 300$
3	<i>Cross-Flow</i>	$40 \leq N_s \leq 200$
4	<i>Kaplan dan propeller</i>	$250 \leq N_s \leq 1000$

(Sumber; ifhan fimansyah, Studi pembangunan listrik tenaga mikro hidro, 2011)

Dengan mengetahui kecepatan spesifik turbin maka perencanaan dan pemilihan jenis turbin akan menjadi lebih mudah dan dimensi dasar turbin dapat diestimasi (diperkirakan).

## 2. Berdasarkan Head dan Debit

Dalam pemilihan jenis turbin, hal spesifik yang perlu diperhatikan antara lain menentukan tinggi head bersihnya dan besar debit airnya. Faktor yang mempengaruhi kehilangan tinggi pada saluran air adalah besar penampang saluran air, besar kemiringan saluran air dan besar luas penampang pipa pesat (Arismunandar dkk, 2004). Berikut adalah pengertian tentang head dan debit.

### a. Head Bersih (*Net Head*)

Head bersih adalah selisih antara head ketinggian kotor dengan head kerugian di dalam sistem pemipaan pembangkit listrik tenaga mikrohidro tersebut. Head kotor (*gross head*) adalah jarak vertikal antara permukaan air sumber dengan ketinggian air keluar saluran turbin (*tail race*) untuk turbin reaksi dan keluar nozel untuk turbin impuls. Head kerugian pada sistem perpipaan merupakan head kerugian di dalam pipa dan head kerugian pada kelengkapan perpipaan seperti sambungan, katup, percabangan, difuser, dan sebagainya. Cara untuk menentukan head bersih dijelaskan sebagai berikut.

#### 1) Head kerugian aliran di dalam pipa (*Major Losses*)

Persamaan yang digunakan adalah berikut (Fox dan Mc Donald, 1995).

$$hf = f \left( \frac{Lp.Vp^2}{Dp.2g} \right) \quad (2.4)$$

dimana :

$v_p$  = kecepatan rata-rata aliran di dalam pipa (m/s)

$f$  = koefisien kerugian gesek

$g$  = percepatan gravitasi (  $9,8 \text{ m/s}^2$  )

$L_p$  = panjang pipa (m)

$D_p$  = diameter dalam pipa (m)

## 2) *Minor losses*

Head kerugian aliran di dalam sistem kelengkapan pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *inlet loss*, *valve loss* dan *bend loss* berikut (Penche,1998)

### a) *Inlet loss* ( $h_e$ )

$$h_e = \frac{f_e \cdot v_p^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

dimana:

$h_e$  = *inlet loss* (m)

$f_e$  = koefisien bentuk inlet

$v_p$  = kecepatan aliran di penstock

### b) *Valve loss* ( $h_v$ )

$$h_v = \frac{f_v \cdot v_p^2}{2 \cdot g} \quad (2.6)$$

dimana :

$h_v$  = *valve loss* (m)

$f_v$  = koefisien jenis katup (valve)

$v_p$  = kecepatan aliran dipenstock

### c) *Bend loss* ( $h_o$ )

$$h_o = 10\% (h_f + h_e + h_v) \quad (2.7)$$

3) Maka besar total rugi-rugi (losses) yang terjadi adalah berikut.

$$Rugi-rugi(Losses)=Major losses + Minor losses \quad (2.8)$$

4) Sehingga nilai Head bersih setelah dikurangi rugi-rugi adalah:

$$H_{net} = H_{gross} - Losses \quad (2.9)$$

Jika head kerugian pada kelengkapan pipa kecil kecil, maka kerugian dapat diabaikan. Dari data eksperimental, dapat digunakan untuk menghitung Head dengan persamaan sebagai berikut.

$$H = H_{\text{letak bak penenang}} - H_{\text{letak power house}} \quad (2.10)$$

**Tabel 2.2 Aplikasi Penggunaan Turbin Berdasarkan Head**

Jenis Turbin	Variasi Head (m)
<i>Kaplan dan Propeller</i>	$2 < H < 20$
<i>Francis</i>	$10 < H < 350$
<i>Pelton</i>	$50 < H < 1000$
<i>Crossflow</i>	$6 < H < 100$
<i>Turgo</i>	$50 < H < 250$

(Dietzel, 1989)

b. Kapasitas Aliran (Debit)

Debit aliran adalah volume air yang mengalir setiap satuan waktu tertentu. Debit air adalah tinggi permukaan air sungai yang terukur oleh alat ukur permukaan air. Pengukurannya dilakukan tiap hari, atau dengan pengertian yang lain debit atau aliran adalah laju aliran air (dalam bentuk volume air) yang melewati suatu penampang melintang sungai per satuan waktu. Dalam sistem satuan SI besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik ( $m^3/s$ ). Pengukuran debit



dilakukan dengan prinsip mengukur luas penampang basah, kecepatan aliran dan tinggi muka air. Debit dapat dihitung dengan persamaan (Penche, C, 1998).

$$Q = A.V \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$Q$  = Debit (m<sup>3</sup>/s)

$A$  = Luas bagian penampang vertikal (m<sup>2</sup>)

$V$  = Kecepatan aliran rata-rata sungai (m/s)

Pengukuran kecepatan aliran merupakan hasil bagi antara jarak lintasan dengan waktu tempuh dan dituliskan dengan persamaan berikut.

$$V = L/t \quad (2.12)$$

Keterangan :

$V$  = kecepatan (m/s)

$L$  = panjang lintasan (m)

$T$  = waktu tempuh (s)

Kecepatan yang diperoleh dari metode ini merupakan kecepatan maksimal sehingga perlu dikalikan dengan factor koreksi yang tergantung dari jenis saluran seperti pada tabel 2.3.

**Tabel 2.3. Faktor Koreksi Untuk Tiap Jenis Saluran**

<b>Jenis Saluran</b>	<b>Faktor Koreksi (c)</b>
Saluran beton, persegi panjang, mulus	0,85
Sungai luas, tenang, aliran bebas ( $A > 10 \text{ m}^2$ )	0,75
Sungai dangkal, aliran bebas ( $A < 10 \text{ m}^2$ )	0,65
Dangkal ( $< 0,5 \text{ m}$ ), aliran turbulen	0,45
Sangat dangkal ( $< 0,2 \text{ m}$ ), aliran turbulen	0,25

**Sumber : Ifhan fimansyah, 2011**

Dengan memperhatikan factor koreksi tersebut, maka debit air dari suatu saluran dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = c(A_1V_1 + A_2V_2 + \dots + A_nV_n) \quad (2.13)$$

dimana:

$Q$  = Debit ( $m^3/s$ )

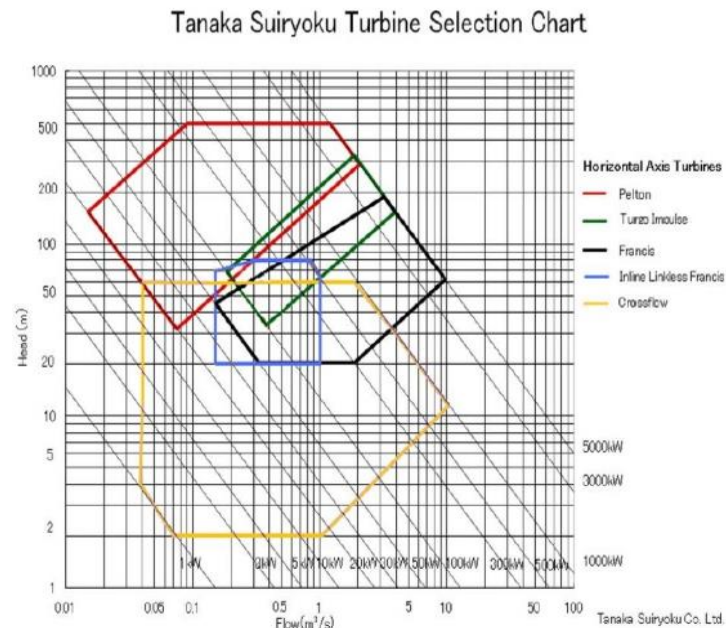
$A$  = Luas bagian penampang vertikal ( $m^2$ )

$V$  = Kecepatan aliran rata-rata sungai ( $m/s$ )

$c$  = factor koreksi

Berdasarkan head dan debit, maka dapat dilakukan pemilihan turbin sebagai berikut (Gambar 2.5).

- a. Head yang rendah yaitu dibawah 40 m tetapi debit air yang besar, maka Turbin Kaplan atau propeller cocok digunakan untuk kondisi seperti ini.
- b. Head yang sedang antara 10 m sampai 200 m dan debit relatif cukup, maka untuk kondisi seperti ini menggunakan Turbin Francis atau Cross Flow.
- c. Head yang tinggi yakni di atas 200 m dan debit sedang, maka yang sesuai untuk digunakan adalah turbin impuls jenis Pelton.



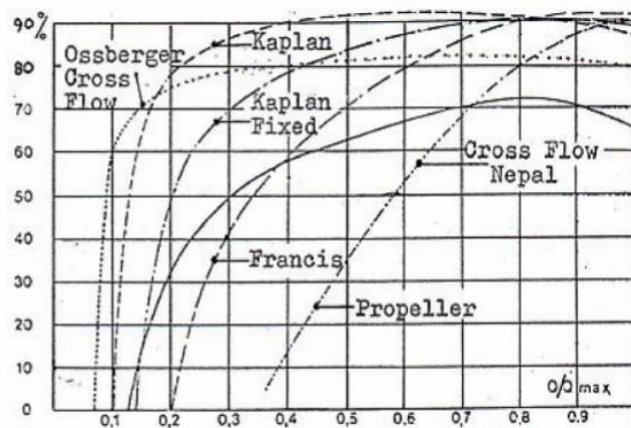
**Gambar 2.6. Grafik Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan Head Dan Flow**  
(Sumber; GMSARN International Journal,7,2013)

### 3. Besarnya Nilai Efisiensinya

Pemilihan turbin juga dapat dilakukan berdasar besar nilai efisiensinya, sebagai berikut.

- a. 0,8 – 0,85 untuk turbin pelton
- b. 0,8 – 0,9 untuk turbin francis
- c. 0,7 – 0,8 untuk turbin Cross-flow
- d. 0,8 – 0,9 untuk turbin propeller/kaplan

Kurva berikut menjelaskan tentang perbandingan efisiensi dari beberapa turbin konvensional. Pada gambar 2.7 dapat kita lihat grafik efisiensi beberapa turbin.



**Gambar 2.7 Grafik Effisiensi Beberapa Turbin Dengan Pengurangan Debit Sebagai Variable (Sumber: Haimeri, L.A., 1960)**

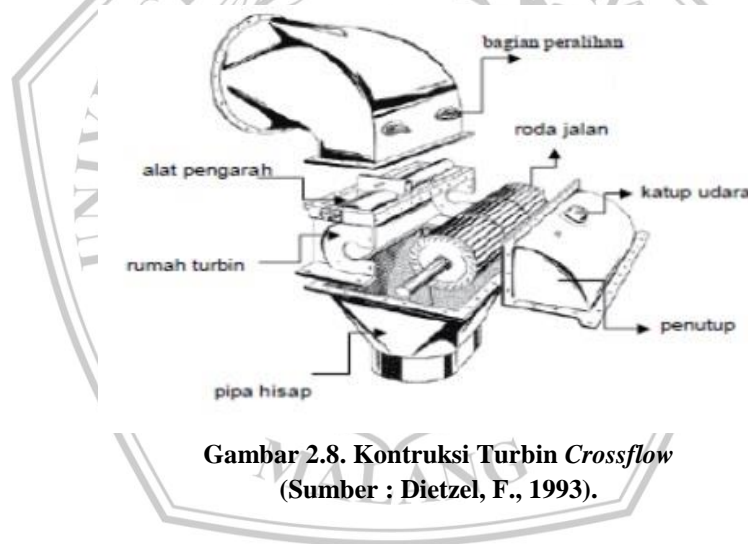
Dari kurva tersebut ditunjukkan hubungan antara efisiensi dengan pengurangan debit akibat pengaturan pembukaan katup yang dinyatakan dalam perbandingan debit terhadap debit maksimumnya.

Pemilihan turbin pada penelitian ini didasarkan pada debit air, ketinggian head bersih (*net head*) dan kecepatan spesifik turbin. Berdasarkan hal tersebut, turbin yang sesuai untuk PLTMH Dompyong adalah turbin *crossflow*.

### 2.5.3 Turbin *Crossflow*

Turbin tipe ini dibuat pertama kali di Eropa. Nama *cross-flow* diambil dari kenyataan bahwa air membentuk aliran silang melintasi kedua sudu gerak atau runner dalam menghasilkan putaran (rotasi). Sedangkan nama Banki (dari Hungaria) dan Mitchell (dari Austria) adalah nama ahli teknik yang mengembangkan prinsip – prinsip turbin tersebut yaitu turbin ini dilengkapi dengan pipa hisap, dan sebagai akibatnya daya yang dihasilkan turbin, proses kerja dan randemen turbin menjadi lebih baik.

Turbin cross-flow ini mempunyai arah aliran yang radial atau tegak lurus dengan sumbu turbin. Turbin ini mempunyai alat pengarah sehingga dengan demikian celah bebas dengan sudu-sudu di sekeliling roda hanya sedikit. Karena itu pada keadaan beban penuh perputarannya roda terjadi sedikit kemacetan, yang menimbulkan sedikit tekanan lebih. Turbin cross-flow terdiri dari tiga bagian utama yaitu roda jalan, alat pengarah dan rumah turbin (Gambar 2.7). Dalam aplikasinya turbin cross-flow baik sekali digunakan untuk pusat tenaga air yang kecil dengan daya kurang lebih 750 kW. Tinggi air jatuh yang bisa digunakan diatas 1 m sampai 200 m dan kapasitas antara  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  sampai  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  (Dietzel, F., 1993).



**Gambar 2.8. Kontruksi Turbin *Crossflow***  
(Sumber : Dietzel, F., 1993).

Komponen utama konstruksi turbin *cross-flow* adalah sebagai berikut.

1. Rumah Turbin
2. Alat Pengarah (distributor)
3. Roda Jalan
4. Penutup
5. Katup Udara

## 6. Pipa Hisap

## 7. Bagian Peralihan

### 2.5.4 Daya yang Dibangkitkan Turbin

Dari data yang telah diperoleh pada bagian kapasitas air  $Q$  dan tinggi air jatuh  $H$ , dapat diperoleh Daya air (Suwarsono, 2017) sebagai berikut.

$$D_{air} = \rho \cdot Q \cdot H \cdot g \quad (2.14)$$

Dimana:

$D_{air}$  = Daya air (Watt)

$\rho$  = kerapatan air (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$Q$  = Debit air (m<sup>3</sup>/detik)

$H$  = tinggi air jatuh (m)

$g$  = gayagravitasi (m/s<sup>2</sup>)

Selanjutnya daya yang dapat dibangkitkan oleh turbin, dapat diperoleh dari perhitungan efisiensi turbin sebagai berikut :

$$\eta_T \frac{P_T}{P_A} \quad (2.15)$$

$$P_T = \eta_T \times P_A \quad (2.16)$$

$$P_T = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_T \quad (2.17)$$

Dimana :

$P_T$  = Daya Turbin (Watt)

$\eta_T$  = efisiensi turbin (%)

## 2.6 Perancangan Dimensi Turbin

### 2.6.1 Alur Pergerakan Air pada Turbin Aliran Silang

Pancaran air dari nosel masuk kedalam runner pada titik A dengan sudut  $\alpha$  yang bersinggungan dengan keliling runner. Kecepatan air sebelum memasuki runner dapat dihitung dengan persamaan berikut (Banki, 2006).

$$V_1 = C(2gH)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Dengan :

$V_1$  = Kecepatan absolut

H = Head ketinggian

C = Koefisien berdasarkan nosel

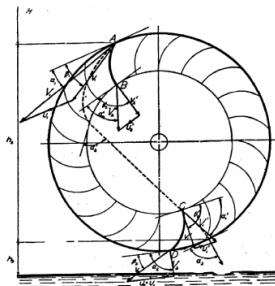
Dalam turbin berhubungan dengan komponen-komponen kecepatan yaitu:

V = kecepatan mutlak

V = kecepatan relative

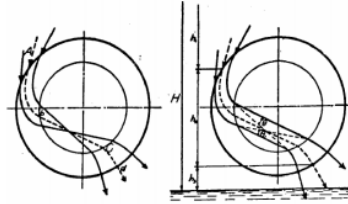
u = kecepatan tangensial roda turbin

$\alpha$  adalah sudut antara kecepatan absolut dengan kecepatan keliling lingkaran runner dan  $\beta$  adalah sudut antara kecepatan relative dengan kecepatan keliling lingkaran runner. Dengan indeks 1 menandakan kecepatan masuk dan indeks 2 menandakan kecepatan keluar sudu jalan turbin.



**Gambar 2.9 Aliran pergerakan air pada turbin aliran silang**  
(Sumber : Mockmore, 2004)

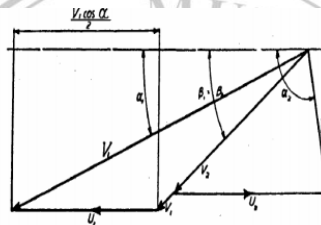
Alur pergerakan terdapat defleksi sebesar  $\theta$  seperti dalam gambar dibawah



**Gambar 2.10 Defleksi pada pergerakan air pada turbin aliran silang**  
(Sumber : Mockmore,2004)

### 2.6.2 Konstruksi Turbin Aliran Silang

Sudut  $\beta_1$  ditentukan oleh nilai  $\alpha_1$ ,  $V_1$ , dan  $u_1$



**Gambar 2.11 Segitiga kecepatan pada turbin aliran silang**  
(Sumber : Mockmore,2004)

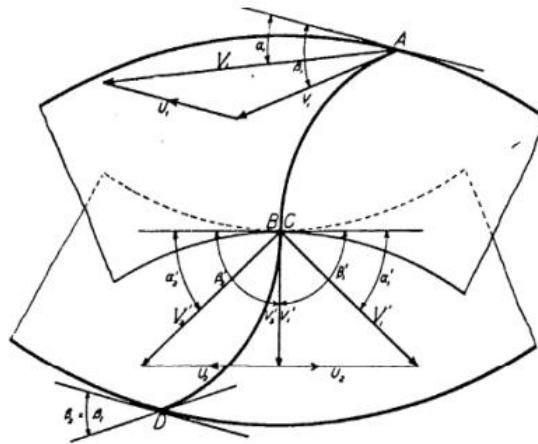
$$\text{Jika } u_1 = \frac{1}{2} V_1 \cos \alpha_1 \quad (2.19)$$

$$\text{Maka } \tan \beta_1 = 2 \tan \alpha_1 \quad (2.20)$$

Maka  $\beta_1 = 29^\circ, 50^\circ$  atau  $30^\circ$  atau nilai pendekatan (Mockmore, 2004)

$B_2'$  adalah sudut sisi atas pada keliling dalam runner. Dengan asumsi  $v_1 = v_2$  dan  $\alpha_1 = \alpha_2$ , untuk membuat aliran pancara air radial maka besarnya  $\beta_1' = 90^\circ$





**Gambar 2.12 Gabungan segitiga kecepatan pada turbin crossflow  
(Sumber : Mockmore, 2004)**

- a. Diameter Luar runner ( $D_1$ )

$$D_1 = 862H^{1/2}/N \text{ (Mockmore, 2004)} \quad (2.21)$$

Dengan :

$H$  = head ketinggian (m)

$N$  = putaran turbin (rpm)

- b. Panjang Turbin ( $L$ )

$$L = 144QN/862 H^{1/2} C_k (2gH)^{1/2} \text{ (Mockmore, 2004)} \quad (2.22)$$

Dengan:

$Q$  = Debit aliran air ( $m^3/s$ )

$C$  = Koefisien nosel = 0.98

$K$  = Faktor koreksi = 0.087

- c. Perbandingan panjang dan diameter turbin

$$LD_1 = 210.6Q/H^{1/2} \text{ (Mockmore, 2004)} \quad (2.23)$$

- d. Jari jari kelengkungan sudu ( $\rho$ )

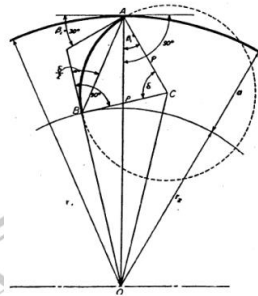
$$\rho = 0.3261 r_1 \text{ (Mockmore, 2004)} \quad (2.24)$$

Dengan:

$r_1$  = jari jari luar runner (m)

e. Lebar velk radial (a)

$$a = 0.17 D_1 \text{ (Mockmore, 2004)} \quad (2.25)$$



**Gambar 2.13 Kelengkungan sudu**  
(Sumber : Mockmore, 2004)

f. Jarak antar sudu (t)

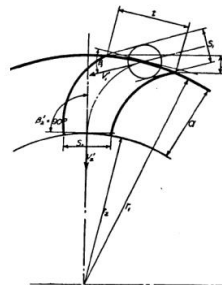
Jarak antar sudu meliputi jarak antar sudu pancaran air masuk ( $s_1$ ) jarak sudu pancaran air keluar ( $s_2$ ) dan jarak antar sudu (t)

$$s_1 = kD_1 \text{ ( Mockmore, 2004)} \quad (2.26)$$

$$s_2 = t (r_2/r_1) \text{ ( Mockmore,2004)} \quad (2.27)$$

$$t = s_1/\sin \beta_1 \text{ ( Mockmore, 2004)} \quad (2.28)$$

k = tetapan (0,075 – 0,10)



**Gambar 2.14 Jarak antar sudu**  
(Sumber : Mockmore 2004)

g. Jumlah sudu (n)

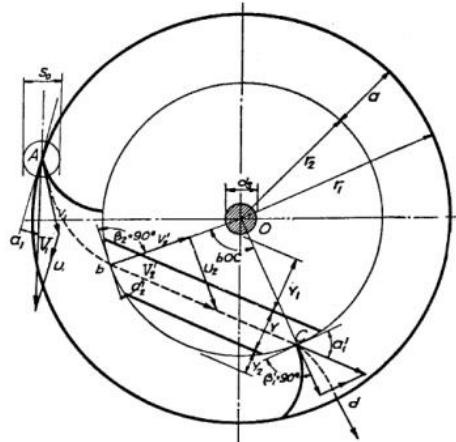
$$n = \pi D_1 / t \quad (\text{Mockmore, 2004}) \quad (2.29)$$

h. Jarak pancaran dari poros ( $y_1$ )

$$y_1 = (0,1986 - 0,945k) D_1 \quad (\text{Mockmore, 2004}) \quad (2.30)$$

i. Jarak pancaran dari keliling dalam ( $y_2$ )

$$y_2 = (0,1314 - 0,945k) D_1 \quad (\text{Mockmore, 2004}) \quad (2.31)$$



**Gambar 2.15 Alur pancaran air**  
(Sumber : Mockmore, 2004)

j. Efisiensi maksimal turbin

$$\text{Jika} \quad u_1 = \frac{1}{2} V_1 \cos \alpha_1 \quad (2.32)$$

$$\text{Maka} \quad \tan \beta_1 = 2 \tan \alpha_1 \quad (2.33)$$

$\psi$  = koefisien empiris yang nilainya sekitar 0,98 (Mockmore, 2004)

$$\varepsilon_{max} = 0,5 C^2 (1 + \psi) \cos^2 \alpha_1 \quad (\text{Mockmore, 2004:9}) \quad (2.34)$$

k. Nosel

Meliputi penampang nosel (A) dan tinggi pancaran air nosel ( $s_o$ )

$$A = Q / V_1 \quad (\text{Mockmore, 2004}) \quad (2.35)$$

$$S_o = A / L \quad (\text{Mockmore, 2004}) \quad (2.36)$$

- l. Sudut pusat sudu jalan (gambar 2.12)

$$\tan \frac{1}{2} \delta = \cos \beta_1 / (\sin \beta_1 + r_2/r_1) \quad (2.37)$$

- m. Perhitungan Daya yang tersedia ( $P_{in}$ )

$$P = \frac{QHe}{8,8} \quad (2.42)$$

$$P = \frac{QH}{8,8} \text{ (HP)} \quad (2.43)$$

Q = debit air (cfs)

H = tinggi air jatuh (*head*) (*feet*)

- n. Perhitungan Daya Keluaran ( $P_{out}$ )

$$P_{out} = V \times I \quad (2.44)$$

V = tegangan (volt)

I = Aruse (A)

- o. Perhitungan Torsi Guna Turbin (T)

$$T = 9,55 \times \frac{P_{out}}{n} \quad (2.45)$$

n = putaran

- p. Perhitungan Efisiensi Total ( $\eta$ )

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.46)$$

### 2.6.3 Poros

Poros adalah salah satu bagian yang terpenting dari turbin yang digunakan untuk meneruskan tenaga bersama-sama dengan putaran. Peranan utama dalam sistem tranmisi seperti itu dipegang oleh poros. Menurut pembebanannya, macam poros untuk meneruskan daya diklasifikasikan sebagai berikut :

### 1. Poros transmisi

Poros transmisi meneruskan beban murni atau puntir dan lentur. Daya ditransmisikan kepada poros melalui kopling, roda gigi, puli sabuk atau sproket, rantai dll.

### 2. Spindel

Spindel merupakan transmisi yang relatif pendek seperti poros utama mesin perkakas, dimana beban utamanya berupa puntiran. Poros ini harus memenuhi syarat deformasinya yang harus kecil serta bentuk dan ukurannya harus teliti.

### 3. Gandar

Merupakan poros yang dipasang di antara roda-roda kereta barang dan tidak mendapat beban puntir, bahkan kadang-kadang tidak boleh berputar. Gandar ini hanya mendapat beban lentur, kecuali jika digerakan oleh penggerak mula dimana akan mengalami beban puntir juga.

Berdasarkan Kiyokatsu Suga dan Sularso (1997), hal-hal penting dalam perencanaan poros adalah berikut.

#### a. Kekuatan Poros

Sebuah poros harus direncanakan hingga cukup kuat untuk menahan beban-beban seperti beban tarik atau tekan, beban puntir atau lentur dan pengaruh tegangan lainnya.

#### b. Kekakuan poros

Apabila kekuatan sebuah poros cukup tinggi namun lenturan atau defleksi puntirnya terlalu besar akan mengakibatkan ketidaktelitian atau getaran dan suara yang dinyatakan sebagai kekakuan poros.

c. Bahan poros

Poros yang dipakai untuk meneruskan putaran tinggi dan beban berat umumnya dibuat dari paduan baja dengan pengerasan kulit yang sangat tahan terhadap keausan. Beberapa baja yang biasa digunakan adalah baja khrom nikel, baja khrom nikel molibden, baja krom dan baja khrom moliblen (Tabel 2.4). Sekalipun demikian pemakaian baja paduan khusus tidak selalu dianjurkan jika alasannya hanya karena putaran tinggi dan beban berat. Penggunaan baja karbon yang diberi perlakuan panas secara tepat perlu dipertimbangkan untuk memperoleh kekuatan yang diperlukan.

**Tabel 2.4 Baja Paduan untuk Poros**

Standar dan Macam	Lambang	Perlakuan Panas	Kekuatan Tarik (Kg/mm <sup>2</sup> )
Baja Khrom Nikel (JIS G 4102)	SNC 2	Pengerasan Kulit	85
	SNC 3		95
	SNC 21		80
	SNC 22		100
Baja Khrom Nikel (JIS G 4103)	SNCM 1	Pengerasan Kulit	85
	SNCM 2		95
	SNCM 7		100
	SNCM 8		105
	SNCM 22		90
	SNCM 23		100
	SNCM 25		120
Baja Khrom (JIS G 4104)	SCr3	Pengerasan Kulit	90
	SCr4		95
	SCr5		100
	SCr21		80
	SCr22		85

Sumber : Kiyokatsu Suga dan Sularso, 1997

Parameter yang digunakan untuk perhitungan poros dengan beban puntir adalah sebagai berikut.

a. Daya rencana ( $P_d$ )

$$P_d = f_c P \text{ (kW)} \quad (2.38)$$

Keterangan :

$f_c$  = faktor koreksi

**Tabel 2.5 Faktor-Faktor Koreksi Daya yang Akan Ditransmisikan,  $f_c$**

Daya yang akan ditransmisikan	$f_c$
Daya rata-rata yang diperlukan	1,2-2,0
Daya maksimum yang diperlukan	0,8-1,2
Daya normal	1,0-1,5

b. Momen puntir rencana T (kg.mm)

$$T = 9,74 \times 10^5 \times \frac{Pd}{n} \quad (2.39)$$

c. Tekanan geser yang diijinkan  $\tau_a$  (kg/mm<sup>2</sup>)

$$\tau_a = \frac{\sigma_B}{(Sf_1 \times Sf_2)} \quad (2.40)$$

Keterangan :

$\sigma_B$  = Kekuatan tarik bahan (kg/mm<sup>2</sup>)

$Sf_1$  dan  $Sf_2$  = faktor keamanan

d. Diameter minimal poros  $d_s$  (mm)

$$d_s = \left[ \frac{5,1}{\tau_a} \times Kt \times Cb \times T \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.41)$$

Keterangan =

$Cb$  = factor  $Cb$  nilainya 1,2 sampai 2,3. Jika diperkirakan tidak terjadi pembebanan lentur maka  $Cb = 1$

$Kt$  = factor  $Kt$  dipilih 1,0 jika beban dikenakan secara halus; 1,9-1,5 jika dikenakan sedikit beban kejutan atau tumbukan; dan 1,5-3,0 jika beban kejutan atau tumbukan besar

#### 2.6.4 Bantalan

Bantalan adalah elemen mesin yang memumpu poros berbeban, sehingga putaran atau gerakan bolak-baliknya dapat berlangsung secara halus, aman, dan

panjang umur. Bantalan harus kokoh agar poros dan elemen mesin lainnya bekerja dengan baik. Jika bantalan tidak berfungsi dengan baik maka kinerja seluruh sistem akan menurun atau tidak dapat bekerja secara semestinya. Jadi bantalan dalam permesinan dapat disamakan peranannya dengan pondasi pada gedung.

Jenis bantalan dibedakan menjadi dua, yaitu bantalan luncur dan bantalan gelinding. Pada bantalan luncur terjadi gesekan luncur antara poros dan bantalan karena permukaan poros ditumpu oleh permukaan bantalan dengan perantaraannya lapisan pelumas. Pada bantalan gelinding terdapat gesekan gelinding antara bagian yang berputar dengan yang diam melalui elemen gelinding seperti bola (peluru), rol atau rol jarum, dan rol bulat. Bantalan yang digunakan pada penelitian ini adalah bantalan gelinding.

Rumus-rumus yang digunakan bantalan :

$$P = XV F_r + Y F_a \quad (2.13)$$

Keterangan :

P = Beban ekivalen

X = Faktor radial

V = Faktor putaran

= 1.0 untuk inner ring yang berputar

= 1.2 untuk outer rig yang berputar

Fr = Beban radial Fa = Beban aksial

Y = Faktor aksial

Faktor umur bantalan ( Fh ) :

$$F_h = \left( \frac{C}{P} \right)^3$$



C = Beban nominal dinamis spesifik

Umur bantalan (  $L_n$  ):

$$L_n = \frac{10^6}{60 \cdot N_p} \times Fh$$

#### 2.6.5 Flywheel

Flywheel (roda gaya) adalah sebuah massa yang berputar dan dipergunakan sebagai penyimpan tenaga didalam mesin. Flywheel digunakan pada mesin sebagai penyimpan cadangan energi pada waktu energi yang disupply adalah lebih dari yang dibutuhkan dan melepaskannya pada suatu waktu apabila energi yang dibutuhkan lebih dari yang disupply. Mesin yang operasinya bersifat intermitten seperti mesin punch, mesin shear, mesin pemaku, mesin penghancur dan lain-lain, flywheel menyimpan energi dari sumber power yang besar selama siklus operasi dan melepaskannya dalam periode yang singkat. Dengan demikian, seluruh energi dari sumber power ke mesin disuplai dengan praktis pada kecepatan konstan selama operasi berlangsung. Pada perancangan ini, flywheel digunakan sebagai penyimpan tenaga dalam runner dan sebagai pengganti pulley yang digunakan untuk meneruskan energi mekanik dari runner menuju generator.

Selisih antara kecepatan maksimum dan minimum selama suatu operasi disebut maksimum percepatan. Perbandingan dari maksimum percepatan terhadap rata-rata kecepatan ( $N$ ) disebut koefisien dari percepatan.

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

Keterangan :

$N_1$  = Kecepatan maksimum dalam suatu siklus (rpm)

$N_2$  = Kecepatan minimum dalam suatu siklus (rpm)

a. Koefisien percepatan

Rumus untuk koefisien percepatan adalah:

$$C_s = \frac{N_1 + N_2}{N}$$

Koefisien percepatan adalah suatu faktor yang membatasi dalam merancang (mendesain) *flywheel*. Nilainya bervariasi tergantung pada jenis mesin dimana *flywheel* digunakan. Tabel berikut ini menunjukkan nilai yang diijinkan untuk koefisien kecepatan pada beberapa mesin.

**Tabel 2.6 Klasifikasi tipe mesin**

No	Type of Machine or Class of Service	Coefficient of Fluctuation of Speed (Cs)
1	Crushing Machines	0,2
2	Electrical Machines	0,003
3	Electrical Machines (direct drive)	0,002
4	Engines with belt transmission	0,03
5	Gear wheel transmission	0,02
6	Hammering machines	0,2
7	Pumping machines	0,03-0,05
8	Machine tools	0,03
9	Paper making, textile and weaving machines	0,025
10	Purching, shearing and power prsses	0,10-0,15
11	Spinning machinery	0,10-0,20
12	Rolling mills and mining machines	0,025

Sumber : R.S Khurmi, J.K Gupta (2005)

b. Kecepatan keliling *flywheel*

$$\sigma_t = \frac{\rho}{g} v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{\sigma_t \cdot g}{\rho}}$$

Keterangan :

$\sigma_t$  = tegangan tarik yang bekerja pada *flywheel* (kg/cm<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa jenis besi tuang (kg/cm<sup>3</sup>)

c. Diameter *flywheel*

$$v = \frac{\pi D \cdot N}{60}$$

Keterangan :

V = kecepatan putaran flywheel

d. Berat *Flywheel*

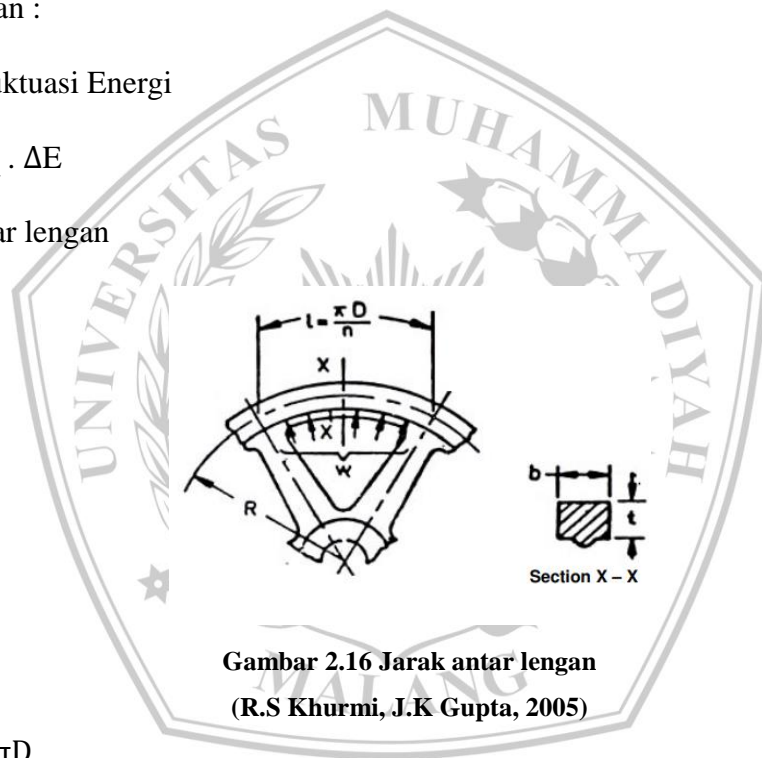
$$W = \frac{E_{rim} \times 2g}{v^2}$$

Keterangan :

$\Delta E$  = Fluktuasi Energi

$$E_{rim} = \eta \cdot \Delta E$$

e. Jarak antar lengan



$$\ell = \frac{\pi D}{n}$$

dimana :

$\ell$  = jarak antar lengan

n = jumlah lengan

Tebal dan lebar

$$W = \text{volume} \times \text{massa jenis}$$

$$W = (b.t.\pi D).\rho$$

Dimana :

b = lebar

b = 2t

t = tebal

$\rho$  = massa jenis besi cor ( $\text{kg/m}^3$ )

#### 2.6.6 Rumah Turbin

Rumah turbin berfungsi untuk melindungi *runner* dan menjadi lajur untuk keluar masuknya air. Rumah turbin terdiri dari casing depan, casing belakang dan casing bawah sebagai penyangga. Seluruh casing tersebut terbuat dari plat baja yang ketebalan platnya ( $Tp$ ) dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$Tp = \left[ \frac{P.D}{\sigma.\eta} \right] + \varepsilon$$

Keterangan :

P =  $Fa$  = beban aksial (kg)

$$Fa = F \sin \alpha$$

D = diameter turbin (mm)

$\sigma$  = tegangan ijin baja ( $\text{kg/mm}^2$ )

$\eta$  = efisiensi sambungan las

$\varepsilon$  = korosi plat yang diijinkan (mm)